



나노재료의 격자변형 분석

글 _ 송경, 오상호
포항공과대학교 신소재공학과

1. 서론

최근 반도체 소자가 나노 스케일로 작아짐에 따라 구성 재료에 작용하는 격자변형의 중요성이 크게 대두되고 있다. 이종재료의 에피택시 성장으로 유발되는 탄성변형에 의한 박막 및 나노 재료의 격자변형은 물리적, 전기적, 광학적 특성을 크게 변화시키므로, 이를 활용하는 strain engineering이 중요한 핵심기술로 발전되고 있다. 이를 위해서는 격자변형량의 공간적인 분포를 정량적으로 분석할 수 있는 분석법의 개발이 반드시 필요하다. 일반적으로 격자변형 분석에는 X-ray 회절, Raman 분광, 투과전자현미경 (Transmission electron microscope; TEM) 등이 활용되고 있으나, 이들 중 TEM만이 유일하게 나노미터 수준의 공간 분해능으로 격자변형을 mapping할 수 있는 방법이다. X-ray와 Raman 등의 회절 및 분광 현상에 기반을 둔 분석법은 시료 전체에 작용하는 격자변형의 평균적인 값만을 얻을 수 있다. 반면, TEM을 기반으로 개발된 분석법은 국소 영역에서의 나노미터 이하의 분해능으로 정확한 격자변형량을 분석할 수 있는 장점이 있다. 하지만, TEM 시편을 제조하는 과정에서 수반되는 시료의 박편화에 따른 변형의 풀림 현상과 시료의 손상 등은 여전히 극복해야할 과제로 남아 있다.

현재까지 개발된 TEM 분석법에는 수렴성빔 전자회절법 (Convergent beam electron diffraction; CBED), 나노빔 전자회절법 (Nano-beam diffraction; NBD), 고분해능 TEM 또는 STEM (Scanning transmission electron micro-

scope) 영상의 geometric phase analysis (GPA), peak pairs analysis (PPA), dark-field off-axis holography (DOAH), dark-field inline holography (DIH) 등이 있다. 전자회절법이나 고분해능 TEM 이미징을 이용한 방법이 현재까지 가장 널리 사용되고 있으나, 최근 개발된 DOAH와 DIH 방법들은 위 두 분석법이 가지는 문제점을 보완하면서도, 정량적인 격자변형 분석이 가능하기 때문에 그 활용성이 기대되고 있다.

본 지에서는 TEM을 이용한 격자변형 분석 기술에 대해 간단히 소개하고, 최근 개발된 DIH를 이용한 나노분해능의 격자변형 분석법에 대해 보다 자세히 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1. CBED

광축에 평행하게 입사하는 전자빔을 이용하여 얻어지는 일반적인 제한시야 전자회절법 (Selected area electron diffraction; SEAD)과는 달리 CBED는 일정한 수렴각도를 가지고 시료에 입사되는 전자빔에 의해 회절패턴이 형성된다. 제한시야 전자회절은 평행한 전자빔을 사용함으로써 넓은 영역의 평균적인 결정 정보가 한 점으로 집중되어 형성되는 반면 CBED 전자회절에서는 큰 수렴각을 가지는 서브나노미터 크기의 집중된 전자빔에 의해 시료의 미소 영역에서의 결정 정보가 원반 형태의 회절 패턴 내부에 나타난다. CBED를 이용하면 제한시



야 전자회절과 동일하게 결정구조 분석이 가능할 뿐 아니라, 결정의 단위격자 셀의 체적 계산, 격자 상수 및 격자변형량의 계산, 전위 관찰, 시료 두께 측정, 그리고 결정의 대칭성 결정 등 다양한 결정 구조와 관련된 분석이 가능하다.¹⁾

CBED는 국부 영역의 격자상수 측정에 유용하다. 큰 수렴각을 이용하여 얻어진 CBED 패턴의 투과 원반 안에서는 검은 선들이 관찰되는데, 이는 고차 Laue 회절선 (High order Laue zone; HOLZ)으로, 이러한 HOLZ선들의 위치는 시료의 격자상수에 매우 민감하게 변화하여 격자상수의 측정이나 격자변형량 분석에 이용된다. 뿐만 아니라, 원반 내 HOLZ 회절선의 위치는 2×10^{-4} nm의 매우 높은 민감도를 가지므로 정확한 격자상수의 측정이 가능하다 (Fig. 1). 이러한 높은 정확도를 격자변형 분석에 활용하기 위해서는 반드시 표준시편의 HOLZ선과 비교하여 분석해야만 한다. 동일 시료내의 상대적인 격자변형을 분석하기 위해서는 먼저, 변형되지 않은 영역에서 CBED 패턴을 얻은 후, 동일한 회절 조건에서 변형 영역으로부터 얻어진 HOLZ선의 상대적인 위치 변화를 정밀하게 측정하여 격자변형량을 분석한다.

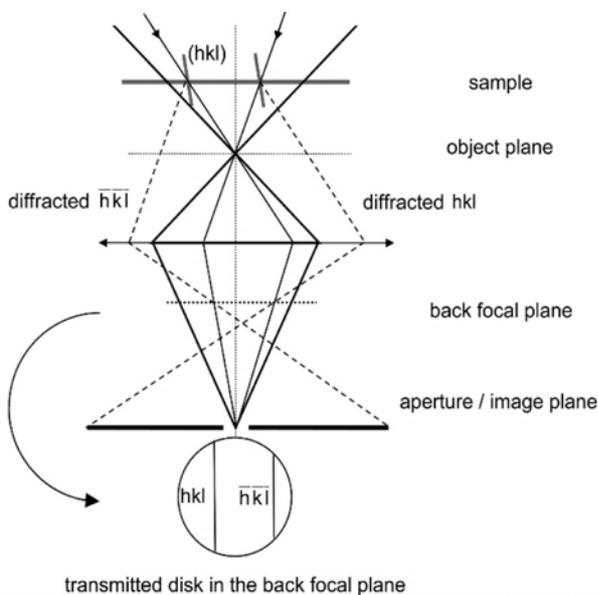


Fig. 1. 수렴성빔 전자회절법에서 HOLZ선의 형성 원리.

2.2. 고분해능 TEM 이미징 분석

재료의 원자배열을 직접적으로 관찰하기 위해 이용되는 고분해능 TEM (High resolution TEM)은 TEM 내에서 시료를 투과하는 투과빔과, 회절빔의 위상차에 의해 생기는 간섭 현상의 결과이다. 이러한 고분해능 TEM 이미지의 2차원 격자 프린지는 시료 내에 격자변형에 영향을 받아 먼간 거리 간격이 변하게 되므로, 이 변화를 정량적으로 측정하면 격자변형량을 계산할 수 있다. 방법론적으로는 서로 다른 두 가지의 접근 방법이 가능하다. 하나는 peak pairs 분석 방법으로, 실공간 (Real space)에서의 원자 위치에 상응하는 밝은 dot의 중심 위치를 정확하게 찾아 위치를 표기한 후, 변형되지 않은 완전한 결정 영역과의 비교를 통해 결정의 국부적인 격자변형량을 측정한다. 다른 한 방법은 GPA로서 고분해능 TEM 이미지의 FFT (Fast Fourier transform)으로 얻어낼 수 있는 역공간의 회절 정보로부터 특정 결정면의 회절점을 선택한 뒤, 결정면의 기하학적 위상값(Geometric phase)의 변화로부터 격자변형을 계산하는 방법이다.

(1) PPA

고분해능 TEM 이미지로부터 직접 격자변형을 분석하기 위한 한 방법으로서 PPA는 먼저 원본 이미지에 존재하는 노이즈를 제거하는 단계를 거친다.²⁾ 이를 위해서, 원본 고분해능 TEM 이미지를 FFT 변환한 후, 역격자공간의 회절 정보에서 이미지 필터를 사용하여 노이즈를 제거한다. 주로 사용되는 이미지 필터에는 Wiener 필터와 Bragg 필터가 있다. Wiener 필터는 TEM 시료 표면에 존재하는 비정질등으로부터 유발되는 low spatial frequency 영역의 배경 노이즈를 제거하는데 효과적이다. Bragg 필터는 주기적으로 반복되는 Bragg 회절점들을 마스크를 사용하여 선택한 후, 다시 Inverse FFT에 변환을 하여 Bragg filtering된 격자 이미지를 얻는다. 이 때, 사용하는 마스크의 패턴 및 크기는 주기적으로 반복되는 회절점을 선택할 수 있도록 적절하게 조절해야 한다. 또한, 분석하고자 하는 영역에 존재하는 결함이나, 변형된 부분의 정보가 손실되지 않도록 적절한 크기의 마스크 결정이 매우 중요하다.



PPA 분석에서 가장 중요한 단계는 고분해능 TEM 이미지에서 원자 위치에 상응하는 밝은 dot의 정확한 위치를 표기하기 위한 peak finding 과정이다. 이 방법에서는 필터링된 이미지로부터 밝은 dot의 local intensity maxima를 찾는다. 그리고 이렇게 선택된 peak point들은 변형이 없는 표준 영역에서 정의된 단위 벡터를 확장하여 얻게 되는 격자점과 peak pair를 형성한다.

Fig. 2는 local intensity maxima에 해당하는 peak point들과 단위 벡터의 확장으로 형성된 격자점과의 peak pair 방법에 대해 설명하였다.²⁾ 변형되지 않은 완전한 결정 영역(표준 영역)에서의 A, B, C 세 개의 peak들로 a, b 두 단위벡터를 결정할 수 있고 이를 전체 이미지에 확장한다. 이와 같은 방법으로 전체 이미지의 peak point들의 상대적인 격자변위 u, v를 계산하여 strain tensor, ϵ_{ij} 를 구할 수 있다 (Fig. 3).

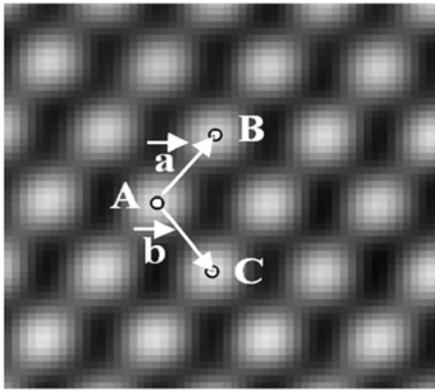


Fig. 2. 고분해능 TEM 이미지 내의 표준 영역에서 A, B, C 세 점으로 결정된 단위 벡터 a, b.

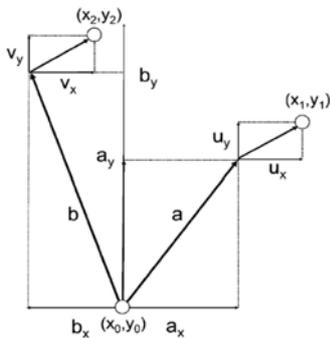


Fig. 3. 단위 벡터 a, b를 이용한 (x_1, y_1) 와 (x_2, y_2) peak point들의 변위 $u=(u_x, u_y)$, $v=(v_x, v_y)$ 측정 방법.

(2) GPA

GPA 방법은 고분해능 TEM 이미지의 FFT로부터 특정 회절빔을 마스크로 선택하여 이 회절빔에 대한 기하학적 위상값을 얻는 것으로 시작한다. 이때 서로 다른 두 개의 회절빔을 선택하여 각각 회절빔의 기하학적 위상값을 구한다. 얻어진 기하학적 위상값은 아래의 식에 의해 선택한 결정면의 변위 벡터로 표현될 수 있다.³⁾

$$u(r) = -\frac{1}{2\pi} [P_{g1}(r)a_1 + P_{g2}(r)a_2] \quad (1)$$

여기서, $P_g(r)$ 는 선택한 회절빔의 기하학적 위상이며, a는 선택한 회절빔 g의 면간거리, $u(r)$ 은 변위양을 나타낸다. 따라서 이 변위벡터를 이용하여 2차원적인 strain tensor, ϵ_{ij} 를 구할 수 있다 (식 2). GPA 과정으로 격자변위를 구하는 과정을 Fig. 4에 정리하여 도식적으로 나타내었다.

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial y} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_y}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2)$$

이와 같이 고분해능 TEM 이미징 방법을 이용한 격자 변형량 분석 방법은 빠르고 쉽게 수행할 수 있어 널리 이용되고 있다. 하지만, 고분해능 TEM 이미지의 획득 단계나 시편 준비 단계에서 필연적으로 야기되는 문제점들을 가진다. 먼저, 고분해능 TEM 관찰에 적합한 아주 얇은 TEM 시료를 제작하는 과정에서 Ar+ 이온빔에 의해 발생하는 시료의 손상이 나노미터 스케일의 격자 변형을 일으킬 수 있으며, 또한 고분해능 TEM 이미지 획득 시 전자빔의 영향으로 인한 시료의 국부적인 손상을 일으킬

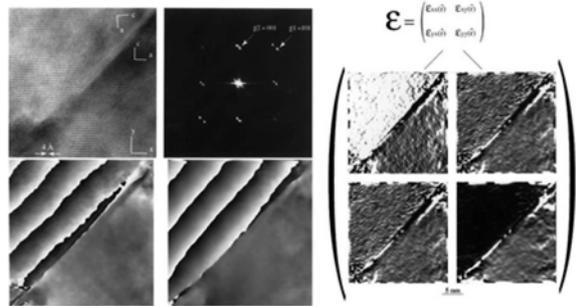


Fig. 4. 고분해능 TEM 영상으로부터 strain tensor, ϵ_{ij} 를 구하는 GPA의 개략도.



수 있다. 그리고 고분해능 TEM 이미지가 얻어지는 영역이 매우 작기 때문에 결과의 대표성이 확보되기 어려운 문제점이 있다. 또한, 근본적으로 고분해능 TEM 영상에 적합한 얇은 TEM 시편에서 발생하는 변형의 풀림 현상을 무시할 수 없어 재료가 가지는 본연의 격자변형 정보가 왜곡될 수 있는 단점이 있다.

2.3. 전자빔 홀로그래피 (Electron holography)

앞서 설명한 고분해능 TEM 이미지 분석법이 가지는 여러 단점을 해결할 수 있는 방법으로 최근 개발된 전자빔 홀로그래피 방법을 들 수 있다. Off-axis 방법과 inline holography 방법으로 대표되는 전자빔 홀로그래피 분석은 TEM 내에서 시료를 투과하는 전자빔의 파동함수의 위상 (Phase)을 분석함으로써 가능해진다. 이러한 시료를 투과한 전자빔 파동함수의 위상은 시료의 원자 배열 구조 또는 전·자기적 포텐셜에 직접적인 영향을 받게 되어, 시료 밑 표면에서의 전자빔 파동함수 (Exit-wave function)의 위상을 구하게 되면 원자의 배열에 대한 정보를 알 수 있다.

일반적으로 많이 사용되는 off-axis electron holography는 시료가 없는 진공을 지난 레퍼런스 전자빔과, 시료를 지나면서 위상 변화를 겪은 투과 전자빔을 양전압이 인가된 Au 와이어를 사용하여 서로 중첩시킴으로써 간섭무늬를 형성하여 위상 변화 (Phase shift)를 측정한다. 반면, inline electron holography 방법은 탈초점 이미지 시리즈로부터 수학적 알고리즘을 이용하여 시료 밑 표면의 복소수 파동함수를 얻어내어 시료에 의한 위상 정보를 얻어낸다. Off-axis 또는 inline holography를 투과빔이 아닌 특정 회절빔에 적용하면 회절 전자빔의 파동함수의 위상 이러한 회절 전자빔의 위상은 회절을 일으키는 결정면의 국부적인 변형량에 기인하는 기하학적 위상과 동일하므로, 이 위상값 결과에 대해 GPA 분석을 적용하여 격자변형량을 구할 수 있다.

(1) DOAH

Hýtch 등은 off-axis electron holography 방법을 투과

빔이 아닌 회절빔에 적용하여 격자변형을 측정할 수 있는 분석법을 개발하였다.⁴⁾ 이 방법은 서로 다른 위상 정보를 가지는 두 전자빔이 서로 중첩될 때 형성되는 홀로그래픽 간섭무늬의 형성 원리와 격자상수가 다른 영역의 중첩으로 인해 형성되는 Moiré 무늬 형성 원리를 결합한 것으로 DOAH (Dark-field off-axis holography) 분석법으로 지칭된다. DOAH 분석법의 기본적인 원리는 특정 결정면에 대한 강한 회절 조건에서 격자변형이 없는 결정 지역에서 회절되는 전자빔과 격자변형이 일어난 영역에서 회절된 전자빔이 electrostatic biprism에 의해 중첩되어 간섭무늬를 형성하는 것이다 (Fig. 5). 이와 같은 방법으로 얻어지는 DOAH 법은 마이크로미터 영역의 넓은 field-of-view에서 격자변형 정보를 제공하며, 4~5 nm의 공간 분해능과 0.2%의 분석 정확도를 갖는다. 그러나 electrostatic biprism과 (저배율 영상을 얻기 위한) Lorentz lens가 필요하다는 장비 제약이 따르며, Lorentz 렌즈의 구면수차로 인해 분해능이 다소 저하되는 단점이 있다. 또한 전자빔의 정합도 (Coherency)가 좋아야 정확한 분석이 가능하다.

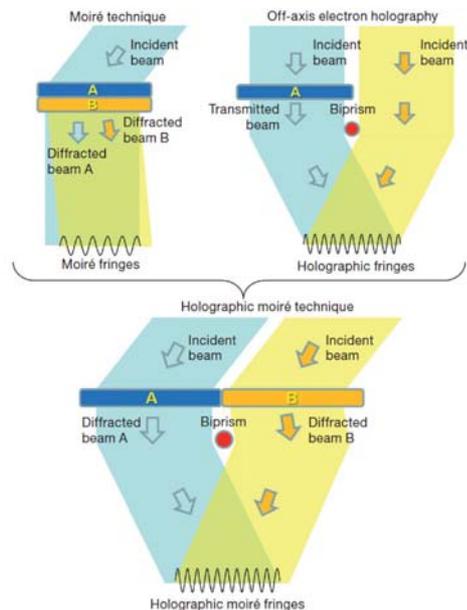


Fig. 5. Dark-field off-axis holography 원리를 설명하는 모식도⁴⁾



(2) DIH

격자 변형 분석을 위한 DIH (Dark-field inline holography) 분석법은 특정 결정면이 강하게 회절하는 영상 조건에서 암시야상 탈초점 시리즈를 기록하여 선택된 회절빔의 위상을 구하는 방법으로, 얻어진 회절빔 파동함수의 위상은 결정면의 기하학적 위상으로 쉽게 전환할 수 있어 시료의 넓은 영역에서 격자변형량을 정밀하게 측정하는데 매우 유용하게 사용된다.

Fig. 6은 암시야상 탈초점 시리즈로부터 격자변형량을 분석할 수 있는 DIH 분석법의 기본 개념을 나타내었다. 투과빔이 아닌 특정 회절빔 하나만을 대물렌즈 조리개로 선택하고, 이 회절빔을 이용하여 일련의 탈초점 이미징을 얻는다. 이때 서로 다른 격자상수를 갖는 시료의 A 부분과 B 부분은 회절 공간에서의 미세한 회절 각의 변화를 야기하는데, 이는 곧 각 회절빔의 위상 변화를 의미한다. 정확한 초점 (Δf)에서 벗어난 TEM 영상들 (Δf_1 , Δf_2 , Δf_3)을 기록하면 실 공간에서 밝고 어두운 Fresnel fringe를 얻을 수 있는데 이를 inline hologram이라고 하며, 이 변화를 통해 시료를 통과한 전자빔의 위상 변화를 추출할 수 있다.

이와 같은 DIH 분석법은 고배율이 아닌 상대적으로 낮은 배율에서 μm 크기의 넓은 영역에서 시료 전체에 걸친 격자 변형 정보를 얻을 수 있으며, 고분해능 이미징 획득을 위한 얇은 시료를 필요로 하지 않기 때문에 시료 제작 과정에서 발생할 수 있는 시편의 손상과 변형의 풀

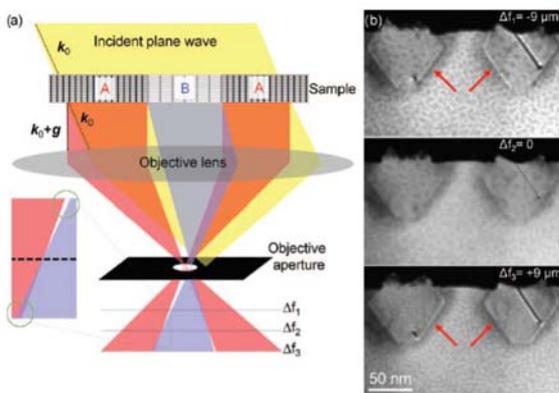


Fig. 6. (a) Dark-field inline holography 원리를 설명하는 모식도와 (b) p-MOSFET 구조에서의 서로 다른 탈초점 값을 가진 암시야상 TEM 이미지들.⁵⁾

림 문제를 해결할 수 있다. 또한, DIH 분석법은 DOAH 분석법이 갖는 장비 제약 (Electron biprism, Lorentz lens) 이 없어 일반적인 TEM에서도 분석이 가능하다. 또한, DOAH에서 사용하는 Lorentz lens에 의해 야기되는 분해능의 저하가 없다. 특히, DIH 분석법에서의 분해능은 회절빔 선택에 사용된 대물렌즈 조리개의 크기와 입사되는 전자빔의 파장에 의해 결정되며, 이로 인해 1 nm 이하의 분해능을 가진 격자변형 정보를 획득할 수 있다.

하지만, DIH 분석법은 탈초점의 변화에 따른 회절 영상의 intensity 변화를 정밀하게 측정하는 분석법이므로, 관찰하고자 하는 부분에서 격자변형 이외의 다른 요소, 예를 들어 시료의 불균일한 두께 또는 휨 정도에 따른 intensity의 변화가 있어서는 안 된다. 또한, 일련의 탈초점 영상들을 획득 과정에서는 긴 노출 시간에 따른 시료의 위치 변화 또는 대물렌즈 전류의 미세한 변화에 기인하는 탈초점 값의 변화가 발생할 수 있으며, 측정 영상들 간의 회전이 동반되기 때문에 탈초점 값의 정확한 결정과 탈초점 시리즈 영상의 정확한 정렬은 정량적인 결과 도출에 반드시 필요한 과정이다.

Fig. 7에 실험적으로 얻은 탈초점 영상들 간의 위치 변화와 회전, 그리고 이를 보정하여 정렬된 결과를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 Δf_1 을 기준으로 Δf_2 , Δf_3 의 탈초점 면에서 기록된 이미지는 각각 $\Delta x_1/y_1$, $\Delta x_2/y_2$ 만큼의 위치 변화와 $\Delta \theta_1$, $\Delta \theta_2$ 만큼의 이미지 회전을 갖는다. 이러한 이미지 간의 위치 변화와 회전은 소프트웨어의 자동 정렬기능을 이용하여 보정이 가능하다. 그러나 탈초점된 이미지 사이의 위치 변화 또는 회전이 매우 커서 자동으로 정렬이 되지 않을 때에는 이미지에 나타난 특

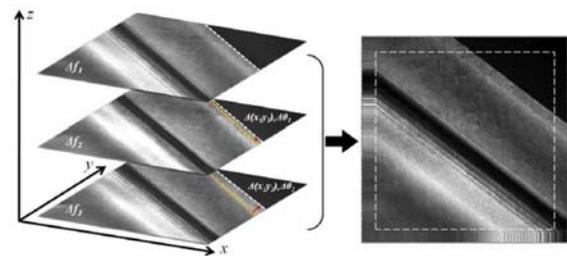


Fig. 7. DIH 분석을 위해 얻어진 일련의 탈초점 암시야상들 간의 회전과 위치 보정.



별한 형상을 기준으로 소프트웨어의 수동 정렬방법을 이용하여 보정하는 과정이 필요하다. 이러한 정렬 과정이 끝난 후에 일련의 이미지를 하나로 모은 through-focus image를 얻을 수 있다. 이미지 정렬 과정에서 위치 변화와 회전으로 인해 신호가 존재하지 않는 부분을 제외하고 나머지 부분은 위상을 측정하기 위한 영역으로 사용된다. 이렇게 정렬된 암시야상의 탈초점 시리즈 이미지들은 phase reconstruction 알고리즘을 이용하여 전자빔의 위상정보를 얻을 수 있다.

2.4. DIH 분석법을 이용한 연구사례

(1) MOSFET 구조의 격자변형 분석

절연게이트형 전계효과 트랜지스터의 대표적인 소자인 metal-oxide semiconductor field-effect transistor (MOSFET)는 현재 대규모 집적회로에 사용되는 소자로, 소스와 드레인 사이의 게이트 전압을 조절함으로써 작동된다. 최근 strained-Si 기술은 소스와 드레인 사이의 채널을 이동하는 전하 캐리어의 이동도를 향상시킴으로서 소자의 작동 속도를 향상시킬 수 있는 방법으로 활발히 연구되고 있다. 이와 같은 “Channel stress engineering (CSE)” 기술은 트랜지스터 특성에 따라 인장 또는 압축 변형을 채널에 유발하여 원하는 방향으로 소자의 성능을 향상시킨다. 이렇듯 구성 재료의 격자변형이 소자의 성능에 결정적인 역할을 하기 때문에 성능의 향상이나 신뢰성 확보를 위해 정확한 격자 변형의 분석을 통한 변형량의 정밀한 제어 능력이 요구되고 있다.

독일 Ulm 대학교 Koch 교수에 의해 개발된 DIH 분석법은 p-형 MOSFET 구조에 처음 적용되어 발표되었고, 대표적인 결과를 Fig. 8에 정리하였다. Si (220) 회절범을 사용한 암시야 이미지를 다른 탈초점 조건에서 여러 장 획득한 후, 수학적 알고리즘을 이용하여 얻어진 위상 이미지는 Fig. 8(a)와 같다. 이때, 특정 회절범만을 이용하여 얻어진 위상 정보는 동일한 결정구조와 성분을 가지는 영역에서 기하학적 위상값과 동일하므로 GPA 방법을 적용하여 국부적인 격자변형 정보를 구할 수 있다 (Fig. 8(b)). 결과로부터 소스와 드레인을 구성하는 SiGe_x과 Si 채널 사이에 압축변형이 분포하는 것을 확인할 수

있었다. 앞서 설명한 바와 같이 특정 회절범 선택을 위해 사용된 TEM의 대물렌즈 조리개는 격자변형 map의 분해능을 결정하는데, 이 분석에서 사용한 조리개의 직경은 10 μm로서 0.77 nm의 분해능을 제공한다(실험에 사용한 TEM의 가속전압은 200 kV로 전자빔의 파장은 0.00251 nm에 해당한다). 또한, Fig. 8(b)의 inset으로 나타난 것과 같이 일반적인 고분해능 TEM 이미지를 통한 GPA 분석법으로는 대략 하나의 소스 드레인 구조에 해당하는 국부 영역에서의 격자변형 정보를 획득할 수밖에 없는데 반해, DIH 분석법으로는 5배 이상의 넓은 영역에서의 격자 변형 정보의 획득이 가능하다. 따라서 DIH 분석법은 넓은 영역에 걸쳐 많은 소자를 분석할 수 있어 분석 결과의 대표성을 확보할 수 있고, 수 백 nm 두께의 시료에 적용이 가능하므로 변형의 풀림 현상을 최소화할 수 있다.

(2) GaN 계열 LED 소자의 격자변형 분석

현재 우리 주위에서 많이 사용되고 있는 LED 소자의 빛을 발하는 활동층은 서로 다른 격자상수를 가지는 재

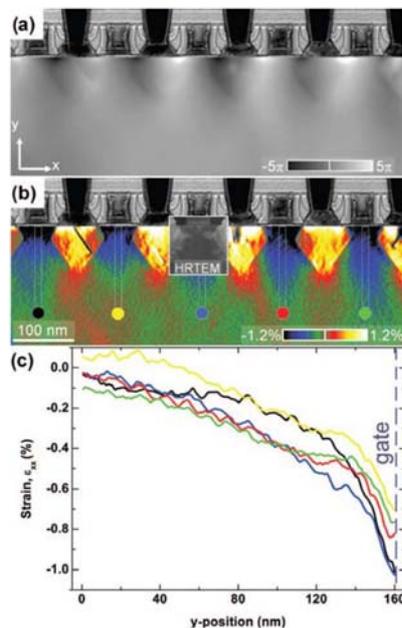


Fig. 8. Si (220) 회절범을 이용하여 얻어진 일련의 암시야상 탈초점 이미지로부터 얻어진 (a) p-형 MOSFET 구조의 기하학적 위상 이미지. (b) 위상 이미지의 GPA 분석으로 얻은 x 축 방향의 격자 변형 (ϵ_{xx}) map. (c) y 축으로의 격자변형 (ϵ_{xx}) profile.⁵⁾



료들의 이중 에피택시 성장을 통해 다중 양자우물 구조로 제조된다. 일반적으로 사용되는 청색, 녹색 계열 LED의 활성층은 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 의 다층 구조를 가지는데, 이러한 GaN 계열의 LED는 구성 물질인 GaN가 가지는 wurzite 결정구조로부터 기인하는 자발분극과, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 층과 GaN층의 격자 불일치에 기인하는 압전분극을 가진다. 이러한 자발분극, 그리고 격자 변형에 의한 압전분극에 의해 계면에 형성되는 분극전하는 내부 양자효율의 저하, 다중 양자우물 활성층에서의 전자의 누설에 의한 efficiency droop 등 소자의 성능을 저하시키는 주요 원인으로 분석되고 있다. 이와 같은 이유로 LED 소자의 광효율을 향상시키기 위한 방법의 하나로 이중 에피택시에 기인하는 다중 양자우물 활성층의 압전분극을 조절하는 “strain-engineering” 연구가 지속되고 있고, 이에 따라 정확한 격자변형 분석이 갈수록 중요해지고 있다. Fig. 9는 GaN 계열 LED 구조에 적용된 DIH 분석 결과를 나타낸다. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 다중 양자우물 구조에서 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 층과 GaN 층의 격자상수는 첨가된 In의 양에 의해 결정된다. 따라서 DIH 분석을 통해 얻어진 격자 변형 분석 결과는 In의 조성으로 변환하여 표현 가능하다. Fig. 9(b), (c)에 보다 자세히 나타냈듯이, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 다중 양자우물구조에서 x축과 y축에 따른 In의 조성분포를 통해서 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 층에 20% In양이 균일하게 존재함을

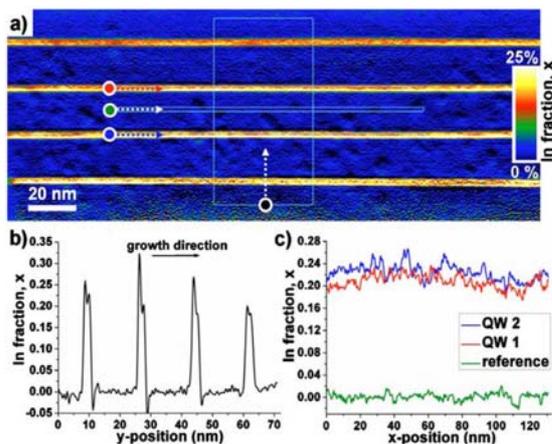


Fig. 9. (a) DIH 분석법을 이용하여 얻어진 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 다층 우물구조 내 In 분포 map. 다중 양자우물 구조에 (b) 수직 방향, (c) 평행한 방향을 따라 표현된 In 분포 그래프⁶⁾

DIH 분석법을 통해 알 수 있다.

Fig. 10은 앞선 Fig. 9에 나타낸 LED 구조보다 더욱 복잡한 다중 양자우물 구조를 가지는 LED 소자에 대한 DIH 분석 결과이다. Fig. 10(a)에서 보이는 바와 같이 다중 양자우물 구조는 2~5 nm 두께를 가지는 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}/\text{GaN}$ 층들로 복잡하게 구성되어 있다. 이 영역에 DIH 분석법을 적용하여 0.77 nm의 서브 나노미터의 분해능을 가진 격자변형 map을 구하였다. 결과에서 확인할 수 있듯이 다중 양자우물 전체에 걸친 격자 변형뿐만 아니라 수 나노미터 두께의 한 층 내부에서의 격자변형 분포 또한 정확히 분석됨을 확인하였다.

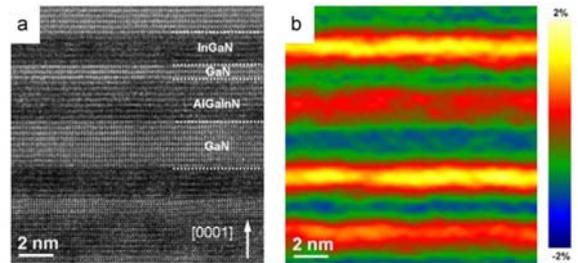


Fig. 10. (a) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}/\text{GaN}$ 다중 우물구조를 가지는 LED 소자의 고분해능 TEM 이미지. (b) DIH 분석을 이용하여 얻은 [0001] 성장 방향으로 격자변형 map.⁷⁾

3. 결론

나노미터 크기를 가지는 반도체 소자에서 구성 재료는 격자변형으로 인해 벌크 재료와는 다른 물리적 특성을 보인다. 최근에는 이러한 격자변형을 의도적으로 소자의 성능 향상에 이용하려는 strain engineering 기술이 개발되고 있다. 이와 같은 연구 동향에 발맞춰 요구되는 정밀한 격자변형 분석은 재료가 가지는 크기 제약으로 TEM을 이용한 분석이 필수적이다. 수렴성법 전자회절법은 나노미터 이하의 정밀성을 보장하지만 재료의 국부적인 조건에 민감하게 반응함으로써 해석에 어려움을 가진다. 반면, 고분해능 TEM 이미지를 이용한 방법은 사용의 편리함으로 널리 이용되고 있으나, 이미지 획득을 위해 얇아진 시료가 가지는 변형의 풀림 현상등의 근본적인 문제점을 가진다. 이에 따라 최근 개발된 DIH 분석법은 나



노미터 이하의 분해능 (~0.8 nm)으로 수 마이크로미터 영역의 격자변형 정보를 2 차원적으로 제공함으로써, 집적화된 소자의 격자변형을 분석하는데 매우 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었다(NRF-2010-0005834, NRF-2011-0029406).

참고문헌

1. G. Brunetti, E. Bouzy, J. J. Fundenberger, A. Morawiec, and A. Tidu, "Determination of Lattice Parameters from Multiple CBED Patterns: A Statistical Approach," *Ultramicroscopy*, **110** 269-77 (2010).
2. P. L. Galindo, S. Kret, A. M. Sanchez, J.-Y. Laval, A. Yáñez, J. Pizarro, E. Guerrero, T. Ben, and S. I. Molina, "The Peak Pairs Algorithm for Strain Mapping from HRTEM Images," *Ultramicroscopy*, **107** 1186-93 (2007).
3. M. J. Hÿtch, E. Snoeck, and R. Kilaas, "Quantitative Measurement of Displacement and Strain Fields from HREM Micrographs," *Ultramicroscopy*, **74** 131-46 (1998).
4. M. Hÿtch, F. Houdellier, F. Hüe, and E. Snoeck, "Nanoscale Holographic Interferometry for Strain Measurements in Electronic Devices," *Nature* **453** 1086-90 (2008).
5. C. T. Koch, V. B. Özdöl, and P. A. van Aken, "An Efficient, Simple, and Precise way to Map Strain with Nanometer Resolution in Semiconductor Devices," *Appl. Phys. Lett.*, **96** 091901 (2010).

6. V. B. Özdöl, C. T. Koch, and P. A. van Aken, "A Non-damaging Electron Microscopy Approach to Map In distribution in InGaN Light-emitting Diodes," *J. Appl. Phys.*, **108** 05613 (2010).
7. K. Song, G.-Y. Shin, J. K. Kim, S. H. Oh, and C. T. Koch, "Strain Mapping of LED Devices by Dark-field inline Electron Holography: Comparison Between Deterministic and Iterative Phase Retrieval Approaches," *Ultramicroscopy*, **127** 119-25 (2013).

●● 송경



- 2001년 전남대학교 물리학과 석사
- 2002년-2010년 한국기초과학지원연구원 연구원
- 2011년-현재 포항공과대학교 신소재공학과 박사과정

●● 오상호



- 2002년 포항공과대학교 신소재공학과 공학박사
- 2002-2003년 독일 Max-Planck-Institute for Metal Research 박사후연구원
- 2003-2005년 한국표준과학연구원 선임연구원
- 2005-2006년 오스트리아 Erich Schmid Institute 연구원
- 2006-2007년 미국 Oak Ridge National Laboratory 연구원
- 2007-2009년 한국기초과학지원연구원 선임연구원
- 2009-현재 포항공과대학교 신소재공학과 조교수, 부교수